第2章

電磁界シミュレータで見る 2.4GHz帯の電磁波干渉問題

メカニズムを理解すれば対策方法も見えてくる

小暮裕明

ここでは，電磁界シミュレータを使ってワイヤレス通信において電波干渉が発生するメカニズムを解説する．電磁界シミュレータを用いることで，目に見えない電波の挙動を視覚的に把握することができる．例えば，アンテナの近くに障害物を置くことによって，電波の反射や回折がどのように起こるのかを理解すれば，障害物に対する適切なアンテナやアクセス・ポイントの設置場所が見えてくる．本稿では，実際に筆者がオフィス内のワイヤレスLANシステムのモデルを作って，シミュレーションを行った．（編集部）

ワイヤレス通信で使われる電波は，3,000GHz（ギガヘルツ）以下の電磁波です．ここで電磁波とは「時間的に変動する電界と磁界が空間を伝わる波」のことであり，紫外線や赤外線，可視光なども電磁波です．電波は金属表面で反射したり，障害物を回折するといった性質があり，閉じられた空間内ではこれらの干渉が発生しやすくなります．進行波と反射波の合成は定在波を生じさせ，特定の位置で電波が弱くなり，通信の妨げにもなります．これらの状況は，アンテナの周りにある障害物の寸法や形状，材質によって大きく変化するため，予測は難しいといえます．

電磁界シミュレータは，マクスウェルの電磁方程式をパソコンで計算することによって，空間の複雑な電磁現象を高い精度で解くソフトウェアです．一般には回路基板や不要放射などの解析に使われていますが，本稿ではオフィスのワイヤレスLANシステムを想定したモデルを作ってシミュレーションしてみました．読者のみなさんには電波の反射・回折によって電波干渉が発生するメカニズムを理解していただきたいと思います．

BluetoothやZigBeeといった近距離のワイヤレス通信システムや一部のRFIDシステムも2.4GHz帯なので，同時に稼働すると混信障害が発生します．しかし，これは電磁界シミュレータで解く問題ではないので，ここでは割愛します．

1 アンテナから旅立つ「電波」とは

携帯電話やワイヤレスLANのアクセス・ポイントで使われるアンテナに，ダイポール・アンテナがあります．**図1**に示すような中央に給電した導線で，その長さはほぼ1/2波長です．これは1880年代にヘルツが実験した，いわゆるヘルツ・ダイポールの動作がもとになっています（詳細は，本誌2004年11月号のpp.139-146，および2005年1月号のpp.128-135に掲載された連載記事「もう一度学ぶ電磁気学の世界」，第7回，第8回を参照）．シンプルな構造で放射効率に優れた方式で，アンテナの基本形の一つとして現在も使われています．

2.45GHzで共振させるためには，1波長が約12cm（　光速÷2.45GHz）なので，アンテナの長さを6cmにします．

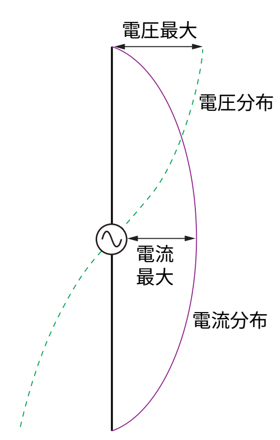


図1
ダイポール・アンテナ
ダイポール・アンテナは中央に給電した導線．図は，ほぼ1/2波長の長さで共振しているダイポール・アンテナの電圧・電流分布を示す．

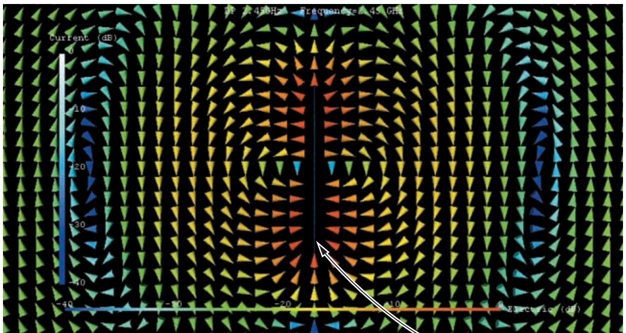


図2　電磁界シミュレータで得た電界ベクトル
電磁界シミュレータ「Micro-Stripes」を用いて，アンテナを含む面に小さな円すい形で表示させた．

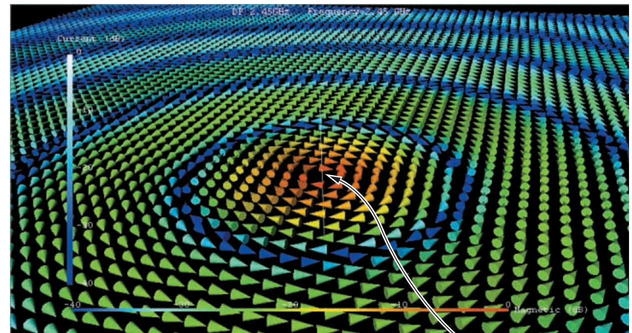


図3　位相を90 °ずらしたときの磁界の分布
アンテナの中心を含む水平面を表示したもの．磁界の向きはある間隔をおいて逆転している．

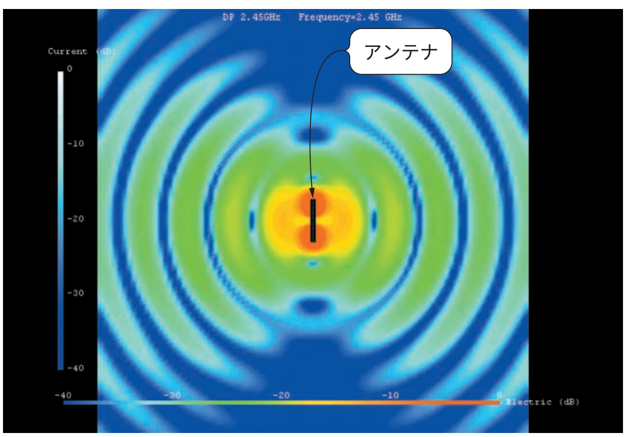


図4　電界強度を色で表示
アンテナ線の上下方向に少し離れると，電界の強い領域がなくなることがわかる．

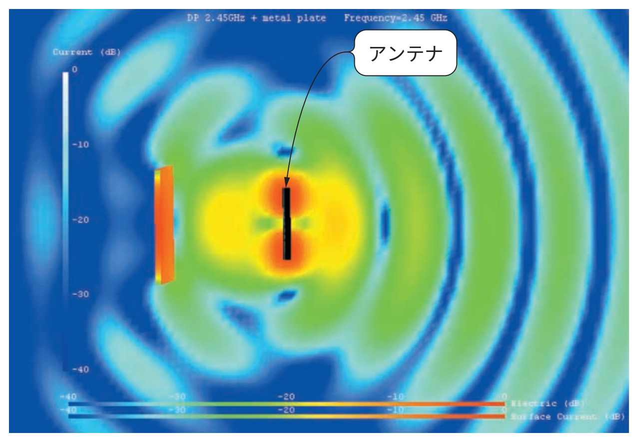


図5　電波は障害物を越えるのか？
アンテナの左側10cmのところにアルミ板（外形寸法10cm × 10cm，厚さ5mm）を置いたときの電界を示す．アルミ板の左側の電界は弱くなっているが，完全になくなったわけではない．

図2は，電磁界シミュレータ「Micro-Stripes注1」で得た電界ベクトルを小さな円すい形で表示しています[(1),(2)]．電界は電位の勾配なので，その向きを考えれば，この瞬間は上部に正，下部に負の電荷（双極＝ダイポール）をイメージできます．図3は，位相を90 °ずらしたときの磁界のようすです．円形ループ状に分布していますが，磁界の向きはある間隔で逆転しています．強い領域と弱い領域は，まるで水面の波紋が広がるようです（シミュレーション結果において，色は電界や磁界などの強度を表している．暖色になるほど強度は強くなる）．

● 電波の正体

図4は図2の電界強度を色で表しており，より広い領域を表示しています．アンテナ線の上下方向に少し離れると，電界の強い領域がなくなることがわかります．一方，水平方向へは，ある角度で電界の強い領域が伝わっています．

電界ベクトルと磁界ベクトルは互いに直交しており，アンテナから波長程度離れると位相がそろってきます．これらによって移動する電磁エネルギー（ポインティング電力）が，空間へ旅立つ電波の正体なのです（詳細は本誌2005年3月号，pp.88-96に掲載された同連載記事の第9回を参照）．

以上は，アンテナが自由空間にあるものとしてシミュレーションした結果です．周りに障害物はまったくないので，アンテナから旅立った電波は気持ち良く（？）宇宙の果てに旅立つことができます．

● 電波は障害物を越えられるか

では，アンテナの近くに金属の板（障害物）があると，電

注1：Micro-Stripesは，TLM（transmission line matrix）法による3次元電磁界解析ソフトウェア（参考文献（1）を参照）．Micro-Stripesに関するWebサイトは「http://www.microstripes.com/」．

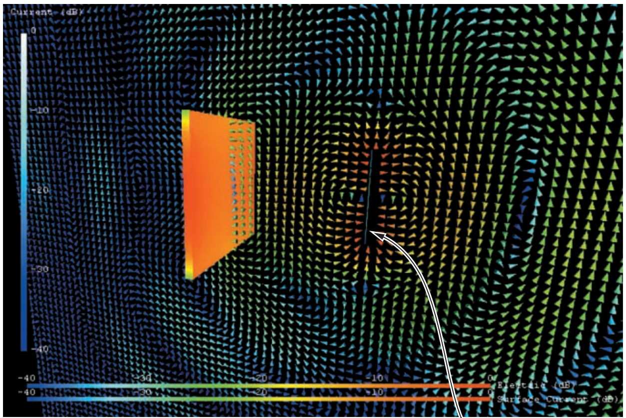


図6　アンテナに面した金属表面の電流分布
アルミ板の縁に沿った電流が流れているが，金属表面に誘導される電流は表面近くの磁界による渦電流が原因である．

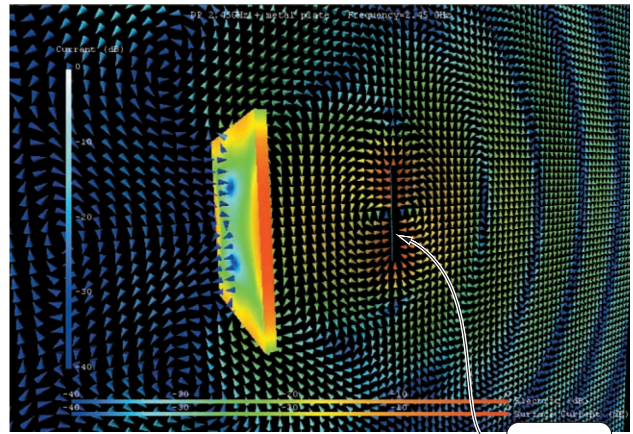


図7　裏面の電流分布
アルミ板を越えて電流が流れていることがわかる．このような現象を「回折」と言う．

波はどうなるのでしょうか．

図5はアンテナの左側の10cm離れた位置に，10cm四方で厚さ5mmのアルミ板を置いたときの電界表示です．アルミ板の左側の領域は，明らかに電界が弱くなっていることがわかります．しかし，電界がまったくなくなったわけではありません．とくに板の中央とアンテナの中心を結んだ直線の先にも電波が伝わっているのは意外です．

次に，金属表面の電流分布に注目してみます．**図6**はアンテナに面した表面，**図7**はその裏側です．それぞれ分布の状態は異なりますが，アルミ板の縁に沿って電流が流れているようです．金属表面に誘導される電流は，表面近くの磁界による渦電流が原因です．この電流は，新たな波源となって電磁波を発生します．**図7**に示すように，金属の裏側に流れる電流によって障害物を越えて電波が伝わる現象を「回折」と言います．

図6の表面電流は**図7**に比べて強く，アンテナに向かう方向へ電磁波を発生すると思われます．これは，反射波の波源とも考えられます．したがって，アンテナから直接発せられる進行波と，アルミ板による反射波が混在することになり，これらを波の合成波として考えると，アンテナと板の位置関係によっては，特定領域の電磁波強度が弱くなるといった問題も予測されるでしょう．

2　閉じた空間内の電波

図5のような波長に近い寸法の金属板では，回折の効果によってなんとかその先と通信できるかもしれません．さらに金属の寸法を大きくして部屋全体を囲むまでになると，内側の表面だけ電流が流れるので，部屋の外へは電波が漏れなくなります．外から電波が到達しても，同じ理由で内部には侵入しないので，これは電磁波シールド・ルームになります．

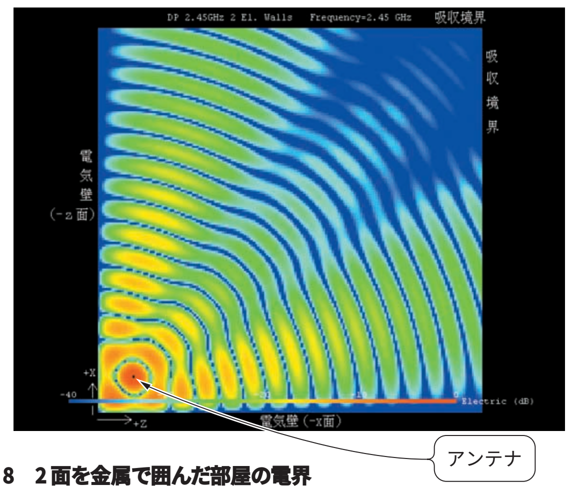


図8　2面を金属で囲んだ部屋の電界
$-z$面と$-x$面だけを金属に設定した場合の電界．壁からそれぞれ10cm離れた位置にダイポール・アンテナを垂直に設置した．

● 部屋の隅にあるアンテナからの電波

閉じた空間内の電波について，まず2面を金属で囲んだ部屋を考えてみます．**図8**は，$-z$面と$-x$面だけを金属に設定して，壁からそれぞれ10cm離れた位置にダイポール・アンテナを垂直に設置したモデルで得た電界です．アンテナの中心を含む水平面の電界強度を表示しています．解析空間の二つの境界を電気壁(electric wall)に設定すること

で，無損失の金属壁を表現しました．残りはいずれも吸収境界に設定しているため，電波の反射はありません．

電界のようすから電波の進む方向を想定すると，金属壁に沿った＋x方向と＋z方向に強い放射があるようです．これらのちょうど中間の方向へも進んでいますが，放射量は金属壁に沿った＋x方向と＋z方向よりも少なくなっています．また，三つの放射方向の間には，放射が非常に少なくなる方向が存在しています．これらの現象は，二つの金属壁で反射した波と，アンテナから発した直接波との合成によって起こると考えられます．波の合成では，同相の波は強め合い，逆相の波は弱め合うので，放射方向によっては電波が伝わらないヌル（null）点が現れることもあります．

図9はさらに＋z面も電気壁に設定した場合の電界分布です．二つの金属壁が平行になったことで，両壁の間で反射が何度も繰り返されることが予想されます．これらの波の合成により，電界の強い分布が島のように点在する領域が現れました．一方，**図9**で海に当たる領域（青色の部分）においては，位相を変化させてアニメーション表示すると，時間の経過にかかわらずつねに電界が弱い位置が固定されている現象も見つかりました．これは定在波が立っていることを示しています．このような場所に電界を検出するタイプのダイポール・アンテナを置くと，信号の受信が困難になります．

図10は4面とも電気壁に設定した場合の電界分布です．島の数が増えたように見えますが，**図11**のように位相を90°変えた結果と比較すると，中央付近のある位置では島と海が交互に現れていることがわかります．また，隅に近い所ではつねに弱い電界を示している領域もあり，複雑な分布になりました．

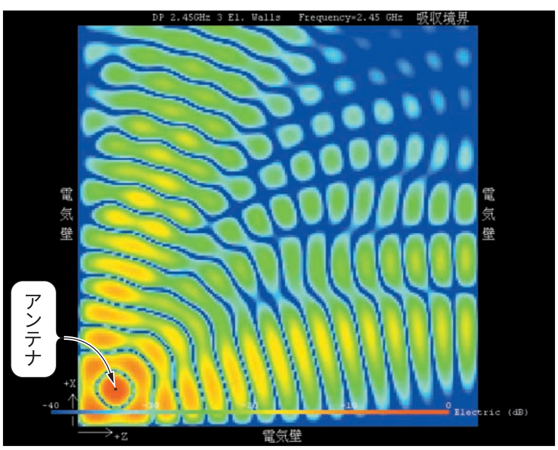


図9　さらに＋z面も電気壁に設定した場合の電界分布
平行する二つの金属壁の間で反射が何度も繰り返され，これらの波の合成によって電界の強い分布が島のように点在する領域が現れた．

●アンテナの位置による違い

図12は，アンテナと電気壁の距離を1/4波長（3.1cm）に設定したモデルのシミュレーション結果です．空間のほかの境界はすべて吸収境界です．これまでは電磁界の分布を瞬時値で表示していましたが，**図12**は実効値（RMS）表示なので，電波は広い領域に比較的均一に放射されていると考えられます．磁界についてのシミュレーション結果は省略しますが，電界の場合と同じような分布を示しました．

次に，アンテナと電気壁の距離を1/2波長に設定したシミュレーション結果を**図13**に示します．やはり実効値表

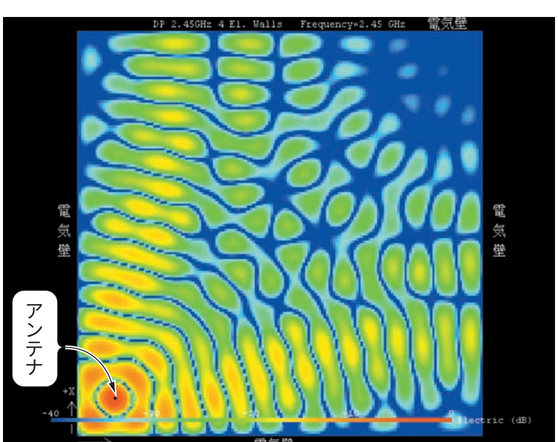


図10　4面とも電気壁に設定した場合の電界分布
図9と比べて，一見，島の数が増えたように見える．

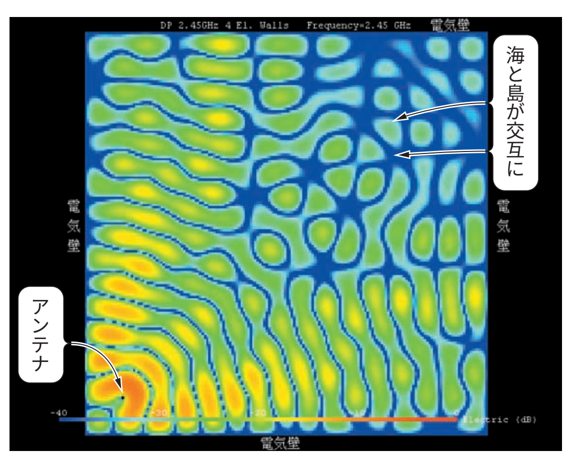


図11　位相を90°変えた結果
図10の位相を90°変えると，中央付近のある位置では島と海が交互に現れる．

示ですが，明らかに電気壁に垂直な方向（＋z方向）へは電波が放射されていません．両者の位置はわずか1/4波長の違いですが，ここでは何が起きているのでしょうか．

これは，**図14**のような波を考えることで理解できます．A点とR点の距離が1/4波長の場合，A点から放射された電波がR点に到達するのに位相が90°遅れます．R点から再放射（反射）する電波は，Rに入射する電波より180°位相が遅れるので，A点から放射される電波より270°遅れます．この電波が右方向へ進み，A点に到達するまでにさらに1/4波長進むので90°遅れます．結局，反射波はA点から右へ進む直接波より360°遅れ，つまり同相で放射されることになります．**図12**は，アンテナから右へ進む波が同相で合成されることを考えれば，このシミュレーション結果も納得できます．

アンテナと壁の距離が1/2波長の場合も同じように考えれば，反射波はA点から右へ進む直接波より540°（つまり180°）遅れるため，アンテナから右へ進む波が逆相で合成されることになります．このことから，直接波は反射波にキャンセルされて，＋z方向へは電波が放射されなくなることが理解できます．

ワイヤレスLANなどのアクセス・ポイントを金属の近くに設置する場合，1/2波長の距離を避ける必要がありますが，もちろん1/2波長の整数倍の距離でも同じ現象が起こることに留意してください．

● 二つの壁でさらに複雑になる

次に，**図12**に対して，右側にも電気壁を置いたモデルを調べます．使用メモリ量を節約するために，対向する壁の間隔を波長の4倍にしています．**図15**はアンテナと壁の距離を1/4波長に設定したモデルの電界の実効値表示です．

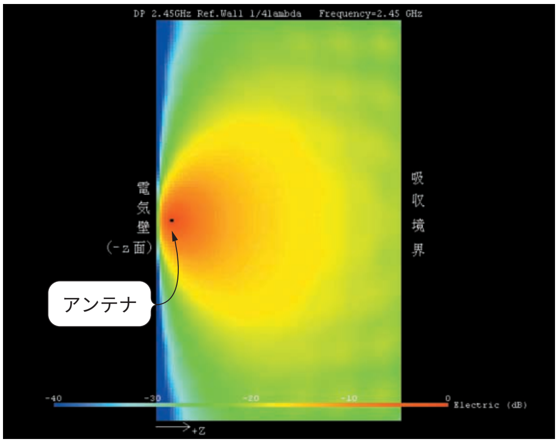


図12　アンテナと壁の距離を1/4波長（3.1cm）に設定したモデル
一つの面（－z面）が金属壁で，残りの境界はすべて吸収境界である．電波は広い領域に比較的均一に放射されていると考えられる．

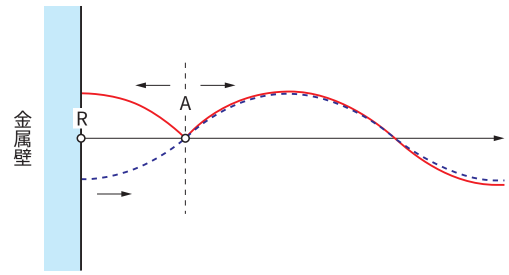


図14　波として考えた説明
A点とR点の距離が1/4波長の場合，A点から放射された電波がR点に到達し，その反射波が再びA点に戻ったとき，反射波はA点から右へ進む直接波より360°遅れ，つまり同相となっている．

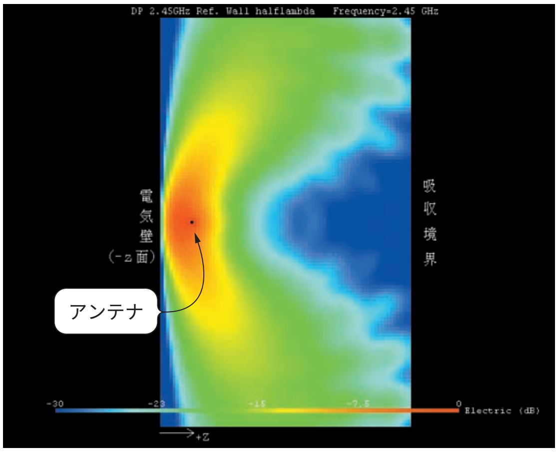


図13　アンテナと壁の距離を1/2波長に設定した結果
明らかに電気壁に垂直な方向（＋z方向）へは電波が放射されていないことが読みとれる．

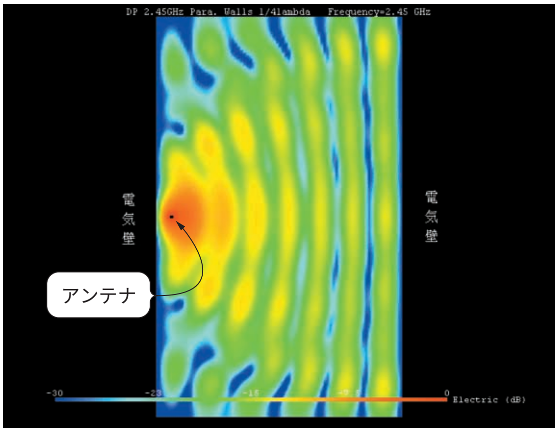


図15　アンテナの左右に壁を置いた場合の電界の実効値表示
図12のモデルに対して，今度はアンテナの右側にも電気壁を置いた．アンテナの距離は左側の電気壁から1/4波長に設定した．

2

また，**図16**は磁界の実効値表示です．同相で合成されて強く放射された波は，右側の電気壁で反射された波と合成され，定在波の発生が認められます．また，両図を比較すると，定在波の電界が最小の位置は磁界が最大で，磁界が最小の位置は電界が最大になっています．これは時間が経過しても変わりません（**図17**）．したがって，電界が最小の位置に電界検出型のアンテナ（例えばダイポール・アンテナ）を置くと受信できなくなります．

以上のことから，アクセス・ポイントと通信する側のパソコンは，設置場所によっては通信が困難になるかもしれません．そこでこれを回避する方策として，電界検出型の

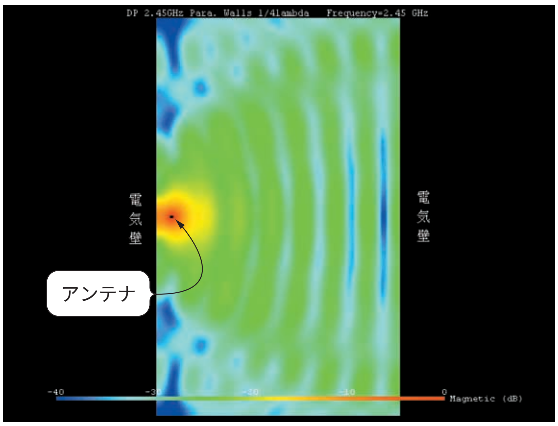


図16　磁界の実効値表示
アンテナの左右に電気壁を設置した場合の磁界．アンテナは左側の電気壁から1/4波長の場所に置いた．

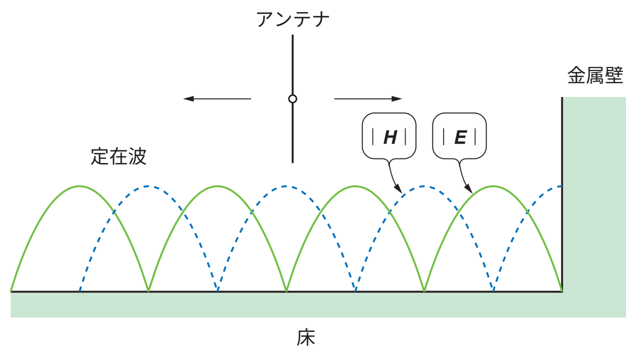


図17　定在波のできかた
金属壁の反射によってできる理想化した定在波分布のようす．壁面上は完全導体（電気壁）なので，電界（電位勾配）はゼロ．逆に，磁界は表面電流が誘導されるので最大になっている．

レイラウンチング法によるシミュレーション

電磁界シミュレータでオフィス全体をモデリングすると，周波数によっては使用するパソコンが搭載する実メモリ容量をはるかに超える容量が必要になることがあります．

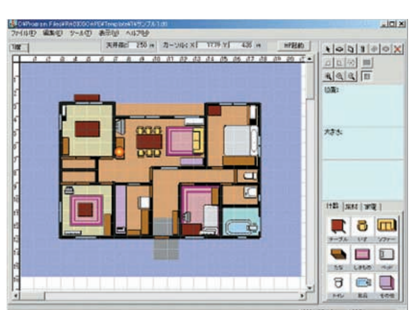
そこで，例えば電磁界シミュレータとは異なる手法ですが，レイラウンチング法[注A-1]による電波伝搬解析手法をもとにして，インターネット経由でシミュレーションできるサービスを利用するという手もあります．オフィス・レイアウト，パソコンなどの電子機器の設置場所を，NECフィールディングASPセンターに送信すると，電波干渉などの伝搬状況を解析して，数分から数十分程度で結果が得られるようです[注A-2]．また，NECのワイヤレスLAN製品「Atermシリーズ」のユーザ向けに，家屋構成データをもとにした電波伝搬特性をシミュレーションするサービスも，レイラウンチング手法によるRADIOSCAPEというシミュレータを使っています[注A-3]（**図A-1**，**図A-2**）．

3次元グラフィックスの描画手法の一つに，レイトレーシング法があります．これは光源からの光線を追跡し，物体の反射や透過を計算して，全体の画像を得る方法です．光も電磁波なので，この方法は送信点から複数の観測点に到達するすべての電波の道筋（ray）を求めるイメージング法です．レイトレーシング法による屋内電波伝搬シミュレーション・システムには，清水建設の「ShimLAB（http://www.shimlab.com/top/skkt.html）」があります．

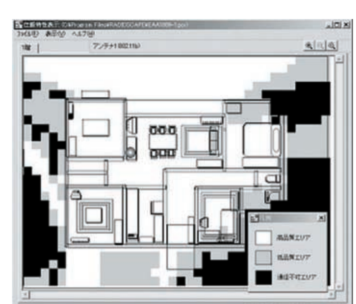
注A-1：レイラウンチング法とは，送信点から1度だけ等間隔で電波を発射し，各観測地点の近くに到達する電波から電波伝搬環境を推定する方法（http://www.nec.co.jp/press/ja/0211/0603.html）．間隔を小さくすることで，精度はイメージング法に近づく．

注A-2：NECフィールディングのワイヤレス・ネットワーク・シミュレーション・サービスに関するWebサイトは「http://www.fielding.co.jp/co/network/radioscape/」．

注A-3：Atermシリーズ用のシミュレーション・サービスに関するWebサイトは「http://121ware.com/aterm/radioscape/server/login.html」．



図A-1　RADIOSCAPEサービスで入力する家屋の間取り



図A-2　RADIOSCAPEサービスのシミュレーション結果
通信の品質が色分け表示される．

ワイドストリップ・アンテナ(E-antenna)と，磁界検出型のスロット・アンテナ(H-antenna)を両方実装しておき，どちらか有利なほうに切り替えるというEHアンテナ・システムも考案されています(3)．

3 難しい現実の問題

3次元CADを持つ電磁界シミュレータは，オフィス内の机，棚やパーティションといったすべての物体をモデリングできます．金属の材質は導電率あるいは表面抵抗で定義し，コンクリート，ガラス，プラスチックといった材料は誘電体として定義できます．

● シミュレーションが抱える「メモリ容量」という問題

しかし，オフィス全体を含み，忠実に構成要素の形状や寸法をモデリングすると，離散化した後のメモリ量が数Gバイト以上になります．パソコンで稼働する電磁界シミュレータは，OSによる2Gバイトという制約があります(左掲のコラム「レイラウンチング法によるシミュレーション」を参照)．これ以上のメモリ容量を使えるパソコンも増えつつありますが，現状では数Gバイト止まりです．

計算精度は離散化した寸法によって決まり，一般に波長を10～20等分するのが目安です．2.4GHz帯では離散化したセルの寸法が6mm～12mmになりますが，それが1cmとしても，高さが3m，周囲5m×5mの狭い部屋でも7,500万セルが必要です．Micro-Stripesの大まかなメモリ使用量の見積もりでは，この値に88を掛けたバイト数ですから，6.6Gバイトになってしまいます．このため，物体の周りを細かく，広い空間をより粗く離散化するといった微調整が必要になってきます．

● 電磁界シミュレーションのじょうずな活用法

アンテナから放射された電波は，さまざまな形状の金属面で反射します．そのため，現実とかけ離れて簡略化されたモデルで得られた結果は，参考にならないかもしれません．

現状のパソコンの能力では，オフィス全体を正確にモデリングすることはない物ねだりになります．そこで電磁界シミュレータの活用法の一つとして，シンプルなモデルを使うことによって，短時間にできる限り多くの知見を得るという使いかたが効果的です．

例えば，図14に示した説明は，聞いた後で考えれば「なるほど」と納得できますが，アクセス・ポイントを置く際，このことに事前に気づくことは難しいでしょう．また，金属のコーナに置いたときには，位置によってはヌル点が生じますが，それが空間のどの位置にどの程度発生するのか，あらかじめその概要を把握しておくだけでも十分有用だと思います．

電気壁では完全反射になるので，最悪ケースの結果が得られます．電波干渉問題やEMC(electro-magnetic compatibility；電磁環境適合性)問題などでは，シンプルなモデルで得た最悪ケースの解答は，それなりに役に立ちます．コンクリートの内部に鉄骨が組んであるオフィスの壁は，3次元CADで忠実に描くこともできますが，これを金属板で簡略化し，表面インピーダンスで反射と吸収の割合を調整する方法も有効でしょう．

● オフィスのモデルを作ってシミュレーションを実施

図18は，オフィスの一部を簡易CADで描いたモデルです．部屋の隅にスチール製の棚があり，それぞれの机は背の低いパーティションで仕切られています．高さ2.1m，周囲3m×3mの空間で，なんとか1Gバイトの使用メモリに収まりました．

机Aの中央で，その10cm上に垂直ダイポール・アンテナの下端を置いたとき，机Aから放射する電波を電界の実効値で表示したのが図19です．アンテナの給電点を含む水平面の分布ですが，机を囲むアルミ製パーティションのために反射を繰り返しており，定在波が認められます．電波は一つの開放された領域からのみ外部へ放射しており，

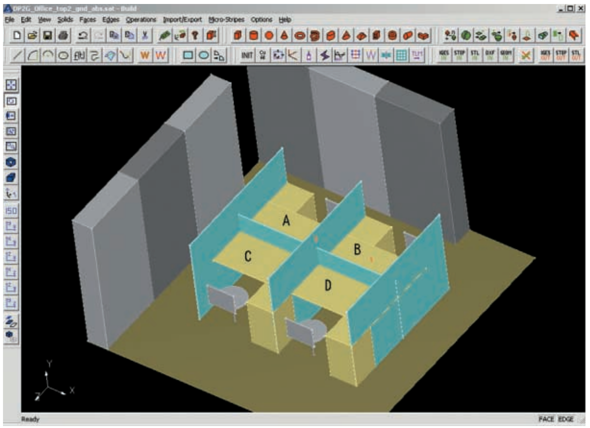


図18 オフィスのモデル
オフィスの一部を簡易CADで描いたMicro-Stripesのモデルを示す．オフィスの空間は，高さ2.1m，周囲3m×3m．

2

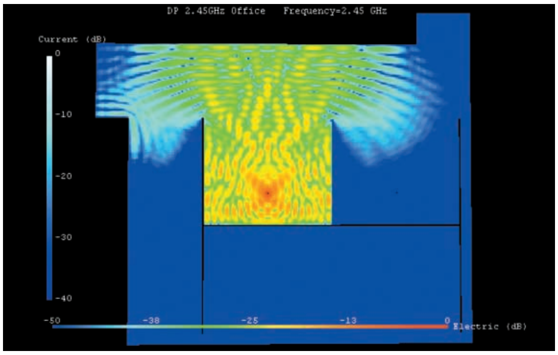


図19　机Aの中央10cm上に垂直ダイポール・アンテナの下端を設置

机Aの中央10cm上に垂直ダイポール・アンテナの下端を置いた．このときのアンテナ中央を含む水平面の電界（実効値表示）を示す．電波は一つの開放された領域からのみ外部へ放射していることがわかる．

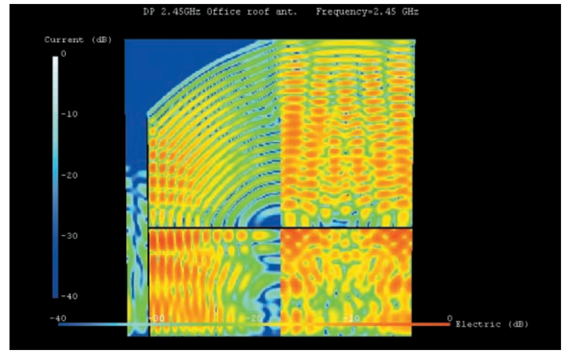


図20　机Dの中央2m上に垂直ダイポール・アンテナの下端を設置

机Dの中央2m上に垂直ダイポール・アンテナの下端を置いたときの机のアンテナ中央を含む水平面の電界（実効値表示）を示す．今度は机Aから机Dまで強い電界の分布を示したが，それぞれの机のパーティション内では定在波が認められる．

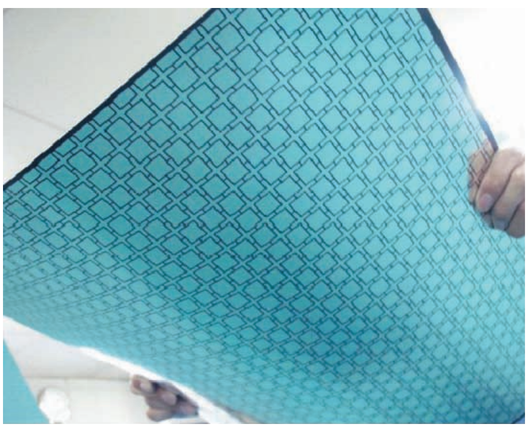


写真1　2.4GHz帯の電波を吸収する薄膜電波吸収体の例

表面に複合パターン素子を最適配列し，電波吸収層と背面金属層を3層にした約3mm厚の薄膜構造．技術的な問い合わせ先は，ニッタ テクニカルセンター（http://www.nitta.co.jp/）．

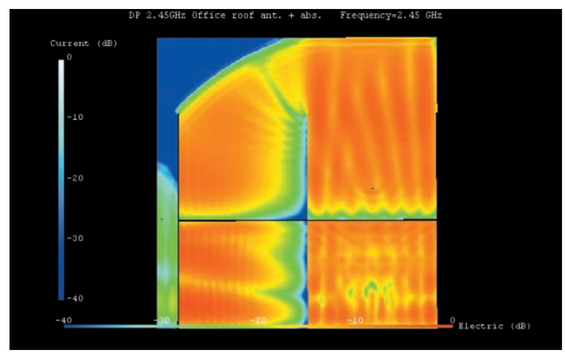


図21　机とパーティションに吸収面を想定したモデルのシミュレーション結果

机とパーティションに15dBの吸収面を想定した．定在波がなくなっていることが確認できる．

机Bにはわずかな量しか到達できません．

図19から，机のパソコン間をアドホック・モード注2で通信するのは難しそうなので，天井にアンテナを置いてみました．

図20は，机Dの中央2m上に垂直ダイポール・アンテナの下端を置いたときの電界の実効値表示です．解析空間が増えたことで使用メモリも増えたので，解析の範囲を調整しました．図19よりやや狭い範囲の結果ですが，今度は机Aから机Dまで強い電界の分布を示しました．

しかし，図19と同じく，それぞれの机のパーティション内に定在波が認められます．もっとも弱い所で－25dB程度ですが，アクセス・ポイントがさらに離れれば，パソコンのアンテナの位置によっては，受信できなくなるかもしれません．

定在波は机やパーティションで電波が反射することによって発生するので，これらの面に電波吸収体注3のシート（写真1）を貼ることによって改善できる場合があります．図21は机とパーティションに15dBの吸収面を想定したモデルの結果です．明らかに定在波がなくなって均一の電界分布になっていることがわかります．

● ノート・パソコンのアンテナからの放射

ワイヤレスLANで使われるアンテナには，ダイポール・

注2：アドホック・モードとは，ワイヤレスLANの通信方式の一つで，アクセス・ポイントを介さずに機器どうしが直接通信を行うモードのこと．

注3：電波吸収体は電波を吸収する材料のことで，用途に応じていくつかの種類が製品化されている．整合タイプは厚さを1/4波長にして，表面と裏面の反射波の位相差180°で相殺させる．同じ材料を1/4波長から外れた周波数で使う不整合タイプは，周波数依存性は低いが吸収性能が劣る．また，薄型化のため，表面にパターン層を持った薄膜シート（写真1）も開発されている．

表1 干渉対策

問題箇所	対　策
アンテナの位置，種類	●金属の近くに置くアンテナは，金属から1/2波長の整数倍の距離を避ける ●コーナや複雑な形状の金属の近くに置くアンテナは，最良位置を探してみる ●波長に比べて大きな金属でアンテナ間を遮らない ●すべてのアンテナを見通せる位置（天井など）にアクセス・ポイントのアンテナを置く ●放射パターンのヌル点の方向は通信が困難になるので避ける ●指向性を持つアンテナ（八木アンテナなど）を使えば，各利用グループ専用の空間に分けられる
定在波	●平行する金属板の間には定在波が立ちやすい．電界型のアンテナは電界の節には置かない ●金属のパーティションで囲まれた領域に発生する定在波は，電波吸収材を貼ることで低減できる
反射，吸収	●金属で反射・回折して複数の経路（マルチパス）を生じた電波を受信すると，位相のずれにより復調できなくなるが，問題箇所に電波吸収材を貼ることで改善できる ●部屋の全面に電波吸収材を貼り，隣接した空間に電波を出さない，利用グループ専用の空間を作る ●遠方へ到達させるために，反射板の効果を利用することもできる

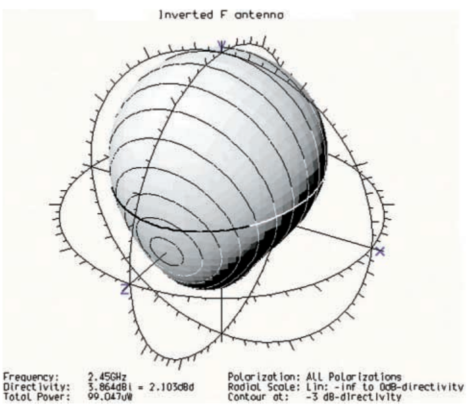


図22　自由空間にある逆Fアンテナの放射パターン
全方向へ平均して放射が得られている．

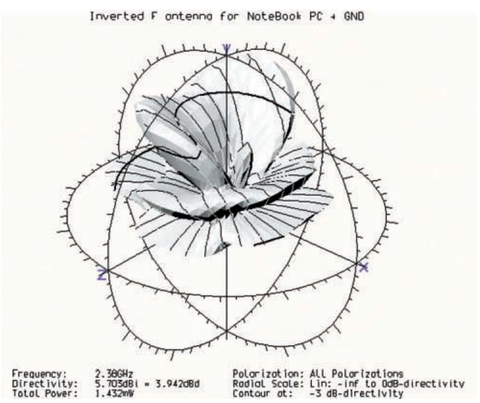


図23　アンテナをノート・パソコンに実装した状態の放射パターン
パソコン本体や机の表面で反射した波と，アンテナからの直接波が複雑に合成され，電波が強め合ったり弱め合ったりしている．

アンテナのほかに，ノート・パソコンに内蔵される逆Fアンテナやスロット・アンテナなどもあります[(2)]．図22は，自由空間にある逆Fアンテナの放射パターンですが，全方向へ平均して放射が得られています．

このアンテナをノート・パソコンに実装した状態で電磁界シミュレーションすると，放射パターンは図23のように大きく変化します[(2)]．これは，パソコン本体やスチール机の表面で反射した波と，アンテナからの直接波が複雑に合成された結果，電波が強め合ったり弱め合ったりするためです．図18のモデルは，ダイポール・アンテナで簡略化しましたが，実装状態のアンテナをモデリングすれば，さらにリアルな解析結果が得られることになります．

● 対策法をまとめる

これまで得られた知見から対策法を表1にまとめます．

ワイヤレスLAN（IEEE 802.11a）にはOFDM（直交周波数分割多重）方式が用いられており，マルチパスには効果があるようです．しかし，2.4GHz帯はRFIDをはじめ，微弱電波で低コストを実現する通信が複数混在するため，空間を改善することで対策を講ずる必要に迫られます．

本稿で理解したメカニズムが，電波干渉というゴーストをバスターするためのきっかけになれば幸いです．

参考・引用*文献

(1) 小暮裕明；電磁界シミュレータで学ぶ高周波の世界，CQ出版社，2003年（第6版）．
(2) 小暮裕明；電磁界シミュレータで学ぶワイヤレスの世界，CQ出版社，2003年（第2版）．
(3) 伊藤公一監修；～移動体通信における～アンテナの解析・設計技術，pp.115-118，トリケップス，1999年．

こぐれ・ひろあき
小暮技術士事務所・技術士（情報工学部門）
http://www.kcejp.com/

2